

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21899

研究課題名（和文）雷ガンマ線フラッシュを航空機から捉える高時間分解能でのガンマ線撮像への挑戦

研究課題名（英文）Study of high timing resolution imaging of Terrestrial Gamma-ray Flashes from aircrafts

研究代表者

中澤 知洋（Nakazawa, Kazuhiro）

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授

研究者番号：50342621

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：雷放電と同期する突発MeVガンマ線 Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF)は人工衛星から観測できるほど強力で、発生源の雷雲中の電子加速域の近くを航空機が飛行すると被曝量が大きき可能性があり、その観測的な理解が重要である。非常に高輝度の観測を実現するため、シンチレータ検出器ではなく、チェレンコフ光を用いる新発想の雷ガンマ線検出器の実証機を開発した。アクリル棒の両端をMPPCで計測することでガンマ線の入射方向も知ることができる。コロナのため10 MeVガンマ線源での実験ができなかったが、宇宙線を用いて指向性を検証し、コンパクト、軽量、低消費電力な装置の試作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TGFの被曝量は数値上は人間に影響がないとは言えないほど強い可能性が高い。特に冬季の日本海岸では雷雲の到達高度が低く、その直上を航空機が飛行する際の被曝量の見積もりは重要である。本研究では、TeVガンマ線計測で用いられるチェレンコフ検出の原理を用いて、軽量で指向性を持ち、検出効率を下げることで高輝度のTGFで回路系が飽和しない装置を実現すべく、試作機でその概念を実証した。宇宙観測の技術を生かし、コンパクトで低消費電力なシステムとなっており、航空機への複数このシステムの搭載も容易である。今後はTGFの地上観測でも利用しつつ、より大型の予算により航空機搭載型の本格装置の開発を目指す。

研究成果の概要（英文）：The Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF), a sudden MeV gamma ray synchronized with lightning discharges, is so powerful that it can be observed from satellites, and its observational understanding is important because the radiation dose of aircraft flying near the electron acceleration regions in thunderclouds can be large. Because of the extremely high luminosity, we have developed a new detector demonstrator that uses Cherenkov light instead of the conventional scintillator detector. The direction of incidence of gamma rays can also be determined by measuring both ends of the acrylic rod with the MPPC. Although we could not conduct experiments with a 10 MeV gamma-ray source due to COVID19, we verified the direction measurements using cosmic rays. We succeeded in establishing a compact, lightweight, and low-power-consumption prototype of the device.

研究分野：高エネルギー宇宙物理

キーワード：雷ガンマ線 電子加速 チェレンコフ検出器

1. 研究開始当初の背景

人工衛星から観測され雷放電と同期する突発ガンマ線 Terrestrial Gamma-ray Flash (TGF) や、日本海岸の地上で冬季に観測され数分間継続する雷雲ガンマ線 gamma-ray glow は、20 MeV に達する連続ガンマ線スペクトルをもつ。雷雲ガンマ線の起源は雷雲の中の静電場粒子加速器であり、濃密な大気中で電子が数十 MeV という相対論的なエネルギーにまで加速をするという、他に類を見ない珍しい現象である。自然界にある人類に最も身近なこの粒子加速器は、原理は1925年にWilsonによって提唱されていたものの、観測にかかるほど大規模な現象ではないと考えられてきたため、その存在が確立したのも1990年代にガンマ線天文衛星が実際に雷放電に同期するTGFを検出するようになってからである。2000年に前後から本格化した研究により定性的な加速メカニズムはわかってきたものの、電子の雪崩増幅や雷雲の電荷構造の放電による自己破壊など、非線形な物理が強く働くため、理論だけではこれを理解することはできず、観測が欠かせない。そもそも加速器の位置や大きさですらまだ明らかでなく、想定される最大被曝量も自明でない。

我々は高エネルギー天体を狙った衛星搭載の硬 X 線、ガンマ線の観測装置の開発で世界をリードするグループの一つである。そのスピンオフとして冬季の日本海岸の地上に、遠隔測定ガンマ線検出器を展開し、雷ガンマ線の観測を2006年から進めてきた(図1)。2017年の観測では、雷放電に伴って「下向き TGF」が発生していること、そのガンマ線が強力であるために大気中で原子核から中性子などを叩き出す光核反応が大規模に起きていることを世界で初めて示した(Enoto et al. 2017, Naure 2017)。身近な雷から核反応を含む多様な高エネルギー現象が確認されたことで、一般社会での反響を測る Altmetric スコアで2017年のNature論文の上位2.6%に入るなど一般市民の関心も強く、また純粋に物理としても大変重要である。

TGF は、はるか600 km 上空の衛星からも検出できるほど強力である。もし、加速領域の直径が250 m とコンパクトであれば、航空機が至近距離でTGFの直撃を受けた際の線量は、0.03 Sv にも達する(Dwyer et al. 2010)。これは東京における年間被曝量約2 mSv の数十倍であり、原理的には軽微な健康被害さえ起きうる。このためTGF加速器の空間広がりや指向性を観測的に知ることは非常に重要である。これは衛星高度からでは観測不可能で、地上観測、そして実際に航空機からの観測が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、航空機や地上からTGFを有効に観測できる検出器システムを開発することである。TGF測定には課題がある。まず、100 μ s の間に0.03 Sv にも達するガンマ線量が非常に強力なため、観測装置が容易に飽和することである。一方で高統計を生かして $\sim 1 \mu$ s の分解能で時刻づけできれば、 ~ 300 m 精度で加速器までの距離も知ることができる。またガンマ線の入射方向が分かれば、電波観測で知る雷放電とTGFの電子加速を関連づけることができる。そこで我々は以下の性能を持つ観測装置の開発を目指した。

1. 航空機等に搭載できるようコンパクト、軽量であること
2. ガンマ線の入射方向を検知する機能を持つこと
3. 10 MeV ガンマ線の瞬間的な大強度の放射内でも正常に動作すること

これを実現するために目をつけたのが、チェレンコフ検出器である。

3. 研究の方法

数十万個ものガンマ線光子が100 μ s の間に到来する高強度のTGFを簡易な装置で検出するために、我々はMeVガンマ線計測でよく用いられる重たいシンチレータ検出器から離れ、TeVガンマ線の観測技術として使われるチェレンコフ光を用いる新しい手法を着想した。透明な物質中で10 MeV級のガンマ線が電子陽電子対生成相互作用をすると、4.5 MeVの電子と陽電子が物質中の光速($\sim 0.7c$)を超えた速度で走ること、指向性を持つチェレンコフ光が放射される。これ

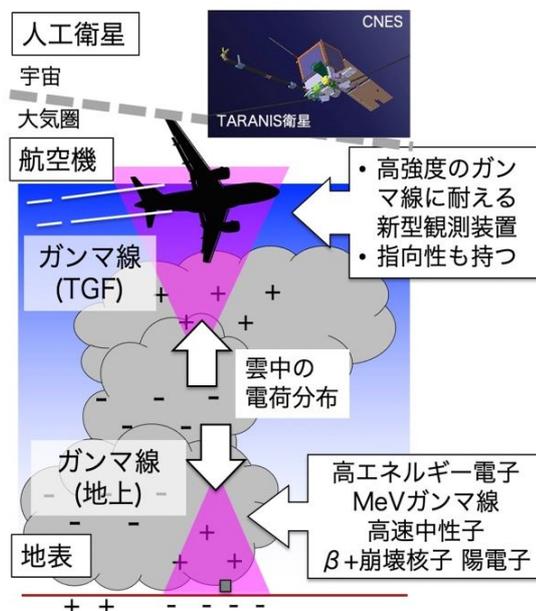


図1. 雷ガンマ線放射とその放射源の観測的研究のポンチ絵。

を光センサーで検出すれば、到来数だけでなくその入射方向を知ることができ、まさに TGF 観測にうってつけのテクノロジーである。

本研究では、航空機等にも容易に搭載できるコンパクトさ、低消費電力を合わせ持ちつつ、10 MeV ガンマ線などの入射方向を検知でき、かつ高い強度のフラックスを測定できる検出器のプロトタイプの実現を目指した。

4. 研究成果

検出器の基本概念を図 2 に示す。屈折率のある透明な素材でできた細長い棒を用意し、この中でチェレンコフ光を発生させる。素材としては、地上加速器実験のチェレンコフ検出器によく用いられ、ガンマ線に対して反応断面積の大きな PbF₄ 結晶と、大強度の信号に耐えられるようガンマ線に対して反応断面積の少ない素材としてアクリルを用いた。

当面の目標として PbF₄ なら 0.5 cm² ほど、アクリルでも 0.05 cm² ほどの有効面積を持たせることを念頭に、長さ 60 mm、幅 7x7 mm² のロッド状素材を用いた。長手方向に ~10 MeV ガンマ線が入射すると、一定の確率で電子陽電子対に変換される。これが当初のガンマ線の運動量を保存して一方向へ進行し、それぞれが円錐状のチェレンコフ光を発生。ロッドの両端に高速の半導体光センサー MPPC などを設置すれば、その光量差から入射ガンマ線の方向を 1 次元で知ることができる。ガンマ線が横から入射すれば指向性はなく、2 つの MPPC の光量は等しくなる。この検出器 3 つで 3 次元を計測すれば、軽い装置で 10 MeV ガンマ線を簡易的に撮像観測できる(図 2 上)。

試作の結果、PbF₄ は高価である上にハンドリング性が難しいことがわかった。検出器としても、屈折率が大きいためチェレンコフ光がエネルギーの低いガンマ線でもよく放射され、かつ重元素素材であるため電子陽電子が散乱しやすく、全体的に指向性を失いやすいため、検出効率を高められる利点を相殺してしまうことから、アクリルを軸に設計を進めることとした。

検出器部は MPPC 光センサーを固定する基板 2 枚の間に、アクリルロッドを挟む構造となる。光学的接続を保つためにシリコンラバーをアクリルと MPPC の間に挟み込む。素材の弾性の範囲内で MPPC を押し付けるように筒構造を設計し 3D プリンタで製作した。図 2 下にその概念設計を、図 3 に実際に試作した検出部を示す。

本検出器のために、これまでの雷 MeV ガンマ線観測装置用のシンチレータ用に用いていた 10x10x7 cm³ の小型データ取得装置を改良して、MPPC 読み出し系を組み上げた。MPPC も購入し、基礎特性評価やアナログ回路のパラメータ調整を実施し、正しく信号が検出できることを検証した。これにより検出器部分が 10x10x10 cm³ 程度、回路部が 10x10x10 cm³ 程度のコンパクトな装置が実現した。消費電力も 5 W 程度であり、市販のリチウムイオン電池や USB 電源で十分に長時間動作する。

概念検証用のこの検出器の開発は COVID19 の最初の流行に伴う混乱の中で数ヶ月遅れた。非常事態宣言に合わせて 2020 年度の初頭に計画していた ニュースパル放射光施設の逆コンプト

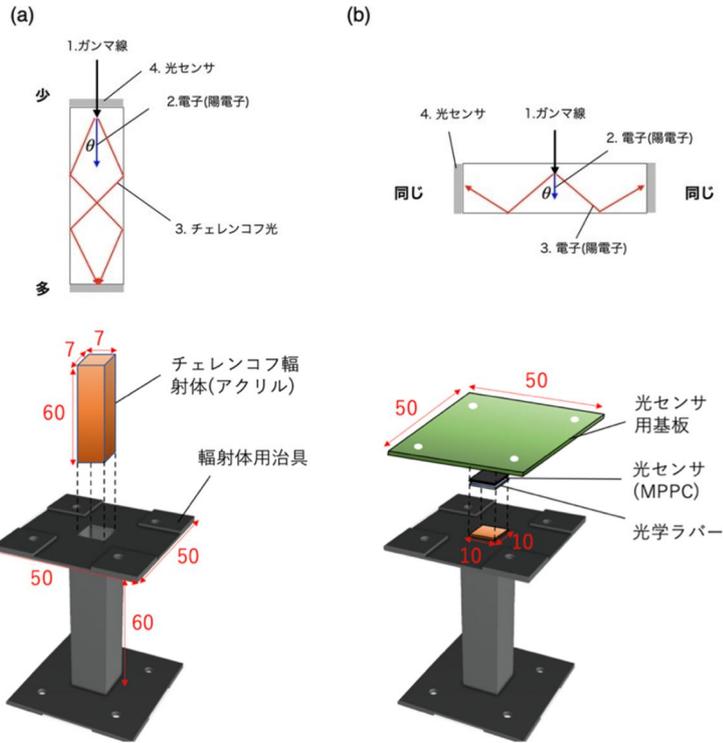


図 2. アクリルロッドでチェレンコフ光を発生させ、指向性を得るフロントエンド部のイメージ。

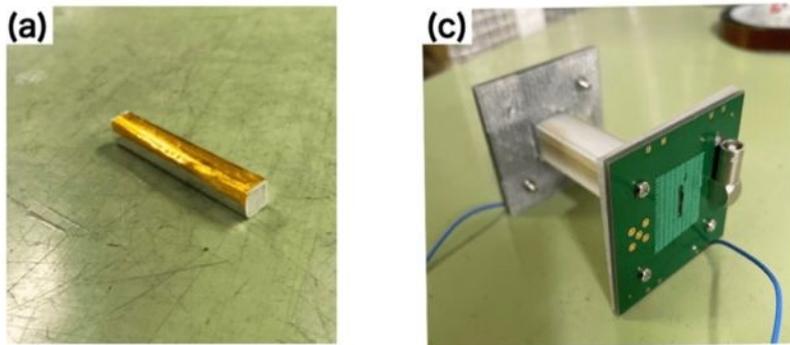


図 3. チェレンコフ光検出器アクリルロッドの試作品。3D プリンタを用いた。

ンビームラインでの試験も延期された。その後、この設備そのものが共用提供を中止したことから、強度の高い 10 MeV ガンマ線の照射の目処が立たなくなった。当面の共用再開の予定もないことから目標を変え、宇宙線ミュオンを用いた基本的な指向性確認試験を実施した。

宇宙線を用いた指向性検知機能確認実験のセットアップを図 4 に、測定結果を図 5 に示す。宇宙線ミュオンが天頂から多く到来することを反映している。図を見ると、確かにロッドの長手方向に入射する荷電粒子の向きを地上側 board 1

の MPPC 検出器を用いてチェレンコフ光で検出できている一方で、天頂側の board 2 の MPPC 検出器では見えていないこと、ほぼ横向きから入ってくる荷電粒子に対しては board 1 と board 2 の 2 つの MPPC 検出器でほぼ同等の信号が得られていることが確認できた。これにより小型の本装置で十分にチェレンコフ光の指向性を検知できることが確認できた。

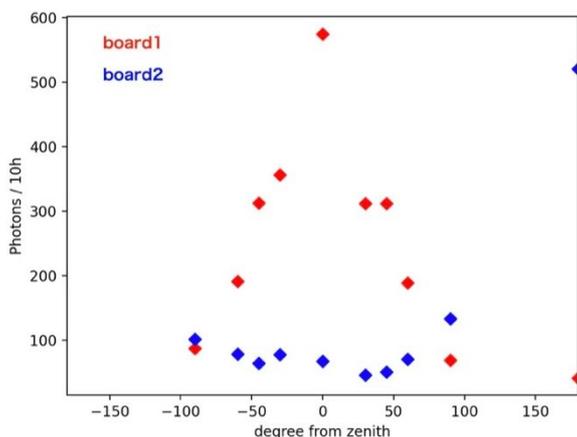


図 5. アクリルロッドチェレンコフ光検出器のミュオンに対する角度依存性。

間に合わなかったが、今後ガンマ線ビームラインなしでも TGF 向け検出器の開発を続ける上で、重要な技術であり、検討と検証を継続してゆく。また当初から希望していた名大 ISEE 研究所が利用する台風観測航空機への試験搭載については、2019-2020 年度には機体改修などでフライトがなかったことから実現していないが、こちらも今後とも検討してゆく。

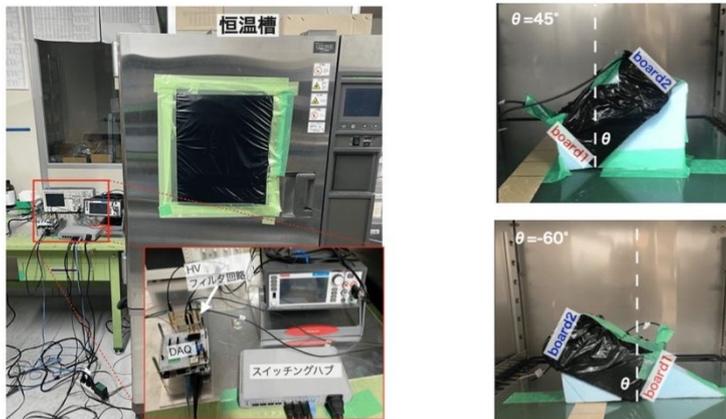


図 4. アクリルロッドチェレンコフ光検出器の角度応答測定実験の様子。

ここまでの研究により、TGF のガンマ線の指向性を検出でき、ようすれば航空機にも搭載できる、小型軽量、低消費電力の検出システム的设计を確立し、基本性能を確認できた。本研究で掲げが 3 つの目標のうち、主として外的要因によって実現できなかったのが、3 番目の項目「10 MeV ガンマ線の瞬間的な大強度の放射内でも正常に動作すること」の実証である。上記のように COVID19 などの影響でガンマ線ビームラインが利用できなくなってしまったためである。実は最終 2020 年度末ごろ、この問題への対策として、原子炉や静電型の陽子加速器を用いた中性子発生源で発生した熱中性子を、窒素ターゲットに照射して 10.4 MeV のガンマ線を発生させ、これを利用する可能性の検討が始まった。予備実験や基礎研究に資金と時間を要することから本研究には

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久富章平
2. 発表標題 雷からの突発ガンマ線観測に向けた検出器システムの高速化
3. 学会等名 第2回MeVガンマ線天文学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中澤知洋
2. 発表標題 2030年代のsub-MeV/MeV観測へ向けて
3. 学会等名 高宇連タウンミーティング ~2030 年代を見据えた将来計画検討~
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久富章平
2. 発表標題 雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト：2020年度における電子加速域の高度測定の試み
3. 学会等名 日本物理学会 春の年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究成果は2020年度、名古屋大学素粒子宇宙物理学専攻の久富君による修士学位論文「雷雲中の電子加速器の誕生消滅の観測とその高度測定用検出器の開発」において、将来検出器として「第7章 チェレンコフ光を用いた TGF の到来方向推定用検出器の開発」にまとめられている。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------